



Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. hat in Kooperation mit dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) und dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung (MW) des Landes Niedersachsen das Testfeld Niedersachsen für die Erprobung und Erforschung vernetzter und automatisierter Mobilität entworfen und aufgebaut [1].

Kartendaten im Testfeld Niedersachsen

Das Testfeld Niedersachsen bietet, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen in der Region, eine offene Plattform für die Erforschung und Evaluation des automatisierten und vernetzten Fahrens auf Autobahnen, Landstraßen und urbanen Bereichen. Der Aufbau wurde hälftig aus EFRE-Mitteln (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) des Landes Niedersachsen und aus Eigenmitteln des DLR finanziert.

Das Testfeld soll den Zugang zu digitalen Daten im Verkehrsbereich für Unternehmen vereinfachen und standardisieren. Die Daten sollen für neue Konzepte in der Mobilität, für neue Dienste oder für Verifikations- und Erprobungszwecke genutzt werden können. Mit dem Testfeld wurde eine Umgebung geschaffen, die zwischen Serieneinsatz und Prüfgelände liegt. Fahrzeuge auf dem Testfeld bewegen sich im realen Straßenver-

kehr, müssen also entsprechenden Zulassungsanforderungen genügen, können aber über detaillierte Umgebungsinformationen verfügen, um eigene Bewegungen oder die der anderen Verkehrsteilnehmer leichter erfassen zu können. Motivation für den Aufbau des Testfelds ist folglich die Schaffung eines Nährbodens für die zukünftige Mobilität und zusätzlich eine umfangreich ausgestattete Erprobungsmöglichkeit für Fahrzeuge auf dem Weg zur Serienfertigung, insbesondere im Bereich der Automatisierung und Vernetzung.

Das Testfeld stellt sich vor

Das Testfeld Niedersachsen umfasst etwa 280 km verschiedener Straßentypen mit Schwerpunkt auf Autobahnen im Großraum Wolfsburg-Braunschweig-Hannover-Hildesheim. Aktuell ist der Ausbau der Module 0, 1 und 4 abgeschlossen (Titelbild / Bild 1) und

wird in den kommenden Jahren um die restlichen Module erweitert. Entlang einiger Streckenabschnitte sind Komponenten der Erfassungstechnik zur Verkehrsbeobachtung sowie Komponenten der Kommunikationstechnik für den Nachrichtenaustausch zwischen Verkehrsteilnehmern und der Straßeninfrastruktur installiert. Die Erfassungstechnik erlaubt die hochgenaue Verfolgung (< 25 cm) aller Fahrzeuge auf einem Abschnitt von knapp 8 km. Die Kommunikationstechnik stellt den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur auf etwa 18 km Autobahn und ähnlicher Länge im innerstädtischen Bereich sicher. Beispielsweise Gefahrenmeldungen oder der Zustand von Lichtsignalanlagen (Ampeln) können so an die Fahrzeuge übertragen werden. Auf Software- und Dienstseite werden den Partnern Schnittstellen zu ebendiesigen Systemen und zu Informationssystemen

| | SD-Karte | HD-Karte |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abbildungsumfang der Straßentopografie | Verkehrsachsen und Einzelstraßenmittelkanten | Fahrstreifengrenzen, Fahrbahnmarkierungen, Bordsteinkanten, ggf. Fuß- und Radwege |
| Abbildungsumfang von Infrastrukturobjekten | ggf. verkehrsregelnde Beschilderung | Beschilderung, Lichtsignalanlagen, Pfosten und Masten, lineare Begrenzungen wie Leitplanken, Schallschutz, Mauern |
| verkehrsregelnde Logik | Fahrtrichtungs- und Abbiegebeschränkungen | zus. Signal- und Schildsemantik, Fahrstreifenutzung |
| Granularität der Logik | verkehrsachsengenau und straßengenau | fahrstreifengenau mit Signalverknüpfung |
| Granularität des Routing-Graphen | verkehrsachsengenau und straßengenau | fahrstreifengenau |
| Dimensionalität der Geometrie | 2-D | 3-D |

Tabelle 1: Gegenüberstellung typischer Merkmale von SD- und HD-Karten.

des Verkehrsmanagements bereitgestellt und Hintergrundsysteme zum Datenmanagement betrieben. Auf Datenseite stehen für Entwicklungszwecke durch simulationsbasiertes Testen Szenariobeschreibungen und ausgewählte Modelle bzw. Simulationen bereit. Als Kernbestandteil des Testfelds sind hochgenaue Straßenkartendaten verfügbar, erweitert um ein Kataster zum Zustand des Testfeldes (u. a. zu Fahrstreifenmarkierungen und Beschilderung).

Hochgenaue Straßenkarten

In vielen Entwicklungsschritten bei der Erprobung und Erforschung vernetzter und automatisierter Mobilität spielen hochgenau vermessene Straßenkarten eine wichtige

Rolle — sogenannte HD-Karten (high-definition maps). Das Testfeld Niedersachsen ermöglicht die Betrachtung verschiedener Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Anforderungen an solche digitalen Straßendaten. Simulationen und Funktionstests im Labor benötigen Geodaten, die ebenfalls autonomen Fahrzeugsystemen im realen Umfeld als Orientierungshilfe dienen oder als vereinfachte 2-D-Karten einen räumlichen Kontext für die Visualisierung von Forschungsergebnissen bilden. Im Idealfall existiert ein einziger Geodaten-Pool, der alle Anwendungsfälle bedienen kann. Häufig weicht dabei die Datenmodellierung der Automobildomäne von typischen Ansätzen der Geoinformationssysteme (GIS) ab [2].

Aber was eigentlich ist eine HD-Karte und was kennzeichnet demgegenüber eine nicht-HD-Karte bzw. SD-Karte (standard-definition map)? Die Literatur liefert keine eindeutige Definition und der Leistungsumfang von "high definition" variiert zwischen unterschiedlichen Kartenanbietern. Eine kürzlich in Australien publizierte Literaturauswertung liefert allerdings einen sehr guten Überblick [3]. Tabelle 1 stellt die typischen Merkmale von SD- und HD-Karten gegenüber. Im folgenden Abschnitt werden die Kernanwendungsfälle des Testfelds mit ihren unterschiedlichen Anforderungen an ein detailliertes Abbild des Straßenraums näher beleuchtet.

Unterschiedliche Anforderungen aus den Anwendungsfällen

Erfassung des Verkehrs

Bevor Fahrzeugfunktionen im realen Umfeld getestet und später auch serienmäßig eingesetzt werden können, gilt es diese Systeme im Hinblick auf Kostenreduktion und Risikominimierung mithilfe des simulationsbasierten Testens hinreichend zuverlässig zu entwickeln. Dazu werden Szenarien definiert, die von solch einem automatisierten System in einer Computersimulation zufriedenstellend absolviert werden müssen. Abgeleitet werden die Szenarien unter anderem durch Beobachtung realer Situationen des Straßenverkehrs. Die stationär installierte Erfassungstechnik an Kreuzungen (Bild 2) und entlang einiger Autobahnabschnitte im Testfeld Niedersachsen ermöglicht die Erfassung von Verkehrsteilnehmern und deren Bewegungsbeziehungen zueinander



Bild 2: Verkehrserfassungstechnik an einer Kreuzung im Testfeld Niedersachsen. (Quelle: DLR)

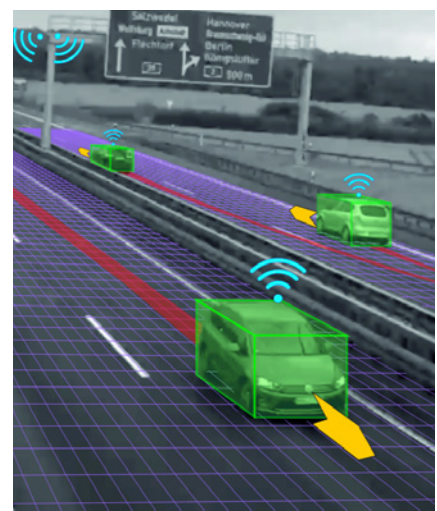


Bild 3: Erfasste Fahrzeuge (grün) mit Trajektorie (rot) und Bewegungsrichtung (gelb). (Quelle: DLR)



Bild 4: Fahrsimulation im Virtual-Reality-Labor (links), in Kombination mit anderen Verkehrsteilnehmern (rechts oben) und im dynamischen Fahrsimulator. (Quelle: DLR)

(Bild 3) — natürlich unter Beachtung aktueller Datenschutzrichtlinien. Man möchte Aussagen treffen können zu Fragen wie beispielsweise:

- „Wie weit hinter der Haltlinie kam dieses Fahrzeug zum Stehen?“ und
- „Wie lang war der Anhalteweg des darauffolgenden Fahrzeugs, wie lang sein Reaktions- und Bremsweg?“

Dies ermöglicht beispielsweise die Identifizierung kritischer Verkehrssituationen, die ein zukünftiges automatisiertes System (besser) bewältigen können muss. Solche Situationen werden formalisiert und als zu testende Szenarien für Simulationen herangezogen. Das Sammeln von Erkenntnissen aus Beobachtungen des Realverkehrs unterstützt die Zusammenstellung von Testfällen für das Absichern autonomer Fahrfunktionen und bildet das Forschungsfeld der Operational Design Domain (ODD). Im Zuge der Kalibrierung von Erfassungstechnik während ihrer Installation wird unter anderem auch auf präzise eingemessene Elemente des Straßenraums zurückgegriffen. Dabei reicht es aus, wenn die Straßendaten in gängigen GIS-Modellen und -Formaten bereitgestellt werden und neben der zweidimensionalen Lageinformation auch Höhenwerte enthalten. Da bei diesem Anwendungsfall der Fokus auf Beziehungen von Verkehrsteilnehmern zueinander und zu ihrem Umfeld liegt, ist eine innere Genauigkeit der Straßendaten („Präzision“ nach DIN ISO 5725 [4]) ausschlaggebender als ihre möglichst fehlerfreie absolute Verortung, also als ihre äußere Genauigkeit („Richtigkeit“ nach DIN ISO 5725).

Fahr- und Verkehrssimulation

Im Entwicklungszyklus werden unterschiedliche Aspekte simuliert. Menschzentrierte Ansätze untersuchen in einer Fahrsimulation aus der Fahrerperspektive das Verhalten eines oder mehrerer Verkehrsteilnehmer, beispielsweise im Umgang mit teil-automatisierten Fahrzeugen (Bild 4). Fahrsimulationen werden in der virtuellen Realität durchgeführt, welche oft auf Realdaten basiert. Hier spielen visuelle Objekteigenschaften, wie Texturen und 3-D-Modelle, und eine detailgetreue Abbildung des Fahrzeugumfelds zusätzlich zur Straßentopografie eine wichtige Rolle. Viele etablierte Simulationssysteme der Automobilbranche erwarten diese Eigenschaften allerdings ebenfalls in einer hochgenauen Straßenkarte vorzufinden. Dies stellt hohe Ansprüche an HD-Straßenkarten, die meist nicht mehr in flachen GIS-Modellen abbildbar sind, sondern auf

metriemodellierung mit diskreten Koordinatenstützpunkten oft als „nicht ausreichend geschmeidig“ angesehen wird. Stattdessen werden Liniengeometrien von den Simulationsframeworks als parametrisierte Kurvenpolynome erwartet, die eine Berechnung von stetigen/„glatten“ Bewegungspfaden erleichtern. Häufig kommen hier Spezialformate wie das standardisierte OpenDRIVE [5] für die Straßenraumabbildung zum Einsatz, welches auch im Testfeld Niedersachsen verwendet wird. OpenDRIVE kombiniert die fahstreifengenaue Modellierung der Straßentopografie durch stetige Kurvenbeschreibungen mit einer feingranularen Topologie und der Möglichkeit zur Spezifizierung visueller Attribute für Visualisierungsanwendungen. Wie im vorherigen Anwendungsfall auch spielt bei der Fahr- und Verkehrssimulation die innere Genauigkeit der vermessenen Daten eine höhere Rolle als die äußere. Für einige Fragestellungen werden sogar komplett synthetische Szenarien ohne reales Abbild im Labor simuliert.

Eigenlokalisierung von Fahrzeugen

Ein hochautomatisiertes oder autonomes Fahrzeug greift für seine Orientierung im Straßen- und Verkehrsumfeld nach aktuellem Stand der Technik auf eine Vielzahl installierter Sensoren zurück. Das Zusammenspiel dieser Fahrzeugsysteme wird unter anderem mithilfe von Sensorsimulationen entwickelt. Für die Sensorsimulation sind Material- und beispielsweise Reflexionseigenschaften von Objekten wichtig. Diese Anforderungen sprengen den Leistungsumfang einer üblicherweise verwendeten HD-Karte und auch der ak-

„Im Idealfall existiert ein einziger Geodaten-Pool, der alle Anwendungsfälle bedienen kann.“

einem komplexeren Datenmodell mit vielen Querverweisen basieren. Wird über eine Verkehrssimulation zusätzlich sogenannter Fremdverkehr hinzugezogen, so ist bei einer Straßenraumabbildung neben der detaillierten Topografie auch eine konsistente Topologie wichtig, um die Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer fahstreifengenaue auch über komplexe urbane Kreuzungen hinweg berechnen zu können (hierzu auch VDVmagazin 1/21, S.24 ff). Mögliche Bewegungspfade des Fremdverkehrs werden aktuell (leider) noch oft aus den Straßenkarten selbst abgeleitet, weswegen eine GIS-typische Geo-

tuellen Implementierung im Testfeld Niedersachsen (die zweite Phase des Testfelds befindet sich aktuell in Planung und soll Teile der Karte um die fehlenden Eigenschaften ergänzen). Allerdings erfolgt bei der Entwicklung autonomer Fahrfunktion eine Transition aus der virtuellen Simulationsumgebung hin zu realen Erprobungsfahrten, bei denen eine hochgenaue Karte in zweierlei Hinsicht relevant ist: für die Positionsbestimmung eines Fahrzeugs und als sogenannter elektronischer Horizont zur Bewertung des Straßenzustands auf der geplanten Route.

Die Positionsbestimmung eines Fahrzeugs ist essenziell und setzt eine zuverlässige, echtzeitfähige Ortungslösung voraus. In urbanem Umfeld und in „topografisch herausfordernden Gebieten“ erfüllen jedoch GNSS-Verfahren (global navigation satellite system, globales Navigationssatellitensystem) allein diese Anforderungen oft nicht ausreichend, weswegen die Ortungslösung der Fahrzeuge mit ausgeklügelten Intertialeinheiten und der erwähnten umgebungswahrnehmenden Sensorik erweitert ist [6]. So ein System kann beispielsweise statische Elemente wie Fahrstreifenmarkierungen, Leitplanken, Pfosten oder Schilder erkennen und deren Positionen relativ zum Fahrzeug berechnen. Eine mitgeführte, hochgenaue Karte ermöglicht den Abgleich dieser erkannten Objekte gegen eingemessene Objekte, deren absolute Geo-Koordinaten nun ebenfalls aus der Karte abgreifbar sind. Aus den zuvor berechneten Objektrelationen und den absoluten Geo-Positionen kann eine Fahrzeugposition „in der Karte“ bestimmt werden, die generell zur Verbesserung der GNSS-Lösung verwendet wird und bei abreißender GNSS-Lösung trotzdem eine Eigenlokalisierung des Fahrzeugs ermöglicht. Bei diesem als Landmarkennavigation bezeichneten Verfahren fungiert die mitgeführte Karte also als eine Art zusätzlicher Sensor. Kritisch ist dabei die schwer zu gewährleistende Aktualität der hochgenauen Kartendaten, weswegen diese Verfahren hauptsächlich in prototypischen Testsystemen genutzt werden. Die Automobilindustrie forscht allerdings akribisch an der Standardisierung von Verfahren, die zukünftigen Fahrzeugen laufend aktuelle Kartendaten für solche Anwendungsfälle bereitstellen können sollen. Die benötigten Geodaten für diesen Anwendungsfall der Eigenlokalisierung müssen für leistungsschwächere Fahrzeugcomputer schlank gehalten werden. Es reichen oft vereinfachte, diskrete Geometrien im OGC-Simple-Feature-Modell [7] mit flachen Attributen, welche auch aus einer komplexeren HD-Karte ableitbar sein müssen. Allerdings ist für die Selbstlokalisierung des Fahrzeugs eine hohe innere und äußere Genauigkeit der Kartendaten erforderlich.

Eine Karte kann zusätzliche, für ein autonomes System relevante Meta-Informationen bereitstellen, die hilfreich bei der Bewegungs- und Verhaltensplanung sind und zur Bewertung des Straßenzustands

auf der geplanten Route konsultiert werden. Sie dient somit als elektronischer Horizont (electronic horizon) [8]: Die Fahrzeugsensorik liefert Erkenntnisse lediglich zum näheren Umfeld, aber „wie eng ist eigentlich die nächste Kurve dort? Ist mit Beeinträchtigungen der Fahrbahnbeschaffenheit zu rechnen und ist der kommende Streckenabschnitt frei von Baustellen?“. Diese Meta-Informationen müssen nicht eingebettet in hochgenau erfasste Straßendaten sein, sondern können als alleinstehende Datenquelle hinzugezogen werden. Mittels Verfahren des Inter-Map-Matchings und der linearen Referenzierung können sie an beliebig detailliert aufgelöste Straßennetze „geheftet“ werden [9].

Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation

Das Testfeld Niedersachsen ermöglicht die Entwicklung von WLAN- und Mobilfunk-gestützter Kommunikationstechnik, welche entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen den Nachrichtenaustausch untereinander (vehicle-to-vehicle communication, V2V) und die Kommunikation mit Infrastruktureinrichtungen ermöglicht (vehicle-to-roadside communication, V2R bzw. vehicle-to-infrastructure communication, V2I). In diesem Anwendungsfall können Infrastrukturkomponenten (roadside units) den Verkehr beispielsweise über Signalphasen informieren, besondere Ereignisse wie freizuhaltende Rettungsgassen kommunizieren oder Nachrichten über das topografische und topologische Layout von

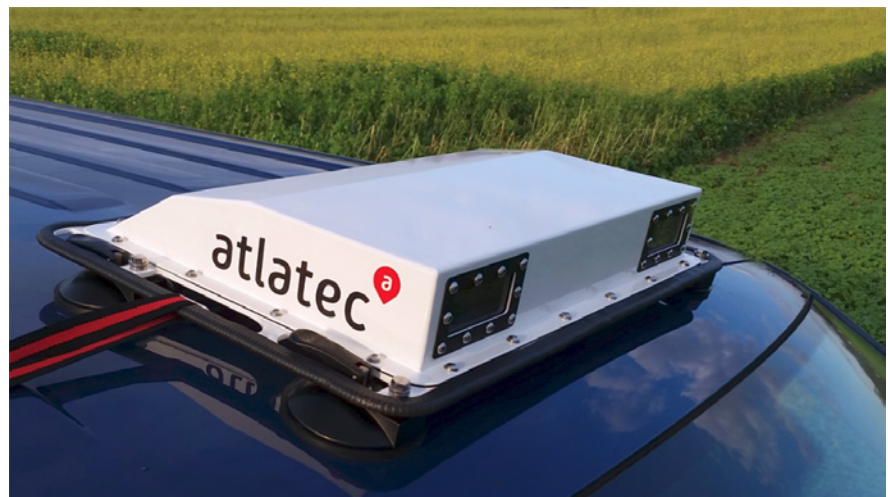


Bild 5: Zur Datenerfassung im Testfeld eingesetzter Sensorträger am Fahrzeug. (Quelle: atlatec GmbH)

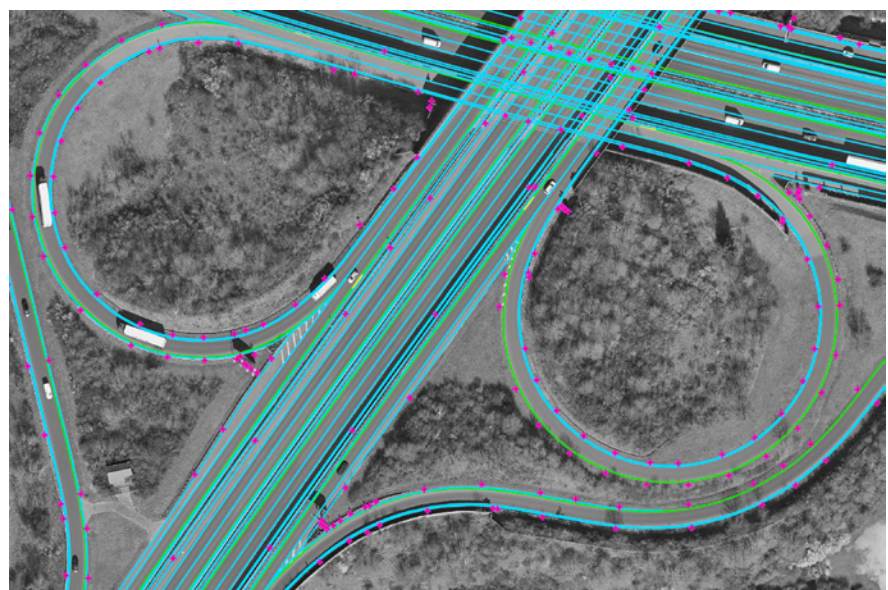


Bild 6: Ausschnitt der HD-Karte im Testfeld Niedersachsen mit Fahrstreifengrenzen (grün, cyan) und ausgewählten Infrastrukturen (magenta). (Quelle: DLR, mit Luftbildkarte der Stadt Braunschweig)

Kreuzungen versenden. Auch hierfür wird eine Straßenkarte als statische Datenbasis mit hoher Genauigkeit benötigt.

Vermessung und Aufbereitung der Straßendaten im Testfeld

Das Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR in Braunschweig hat in den vergangenen Jahren viel Erfahrung beim Aufbereiten heterogener Geodatenbasen für Simulationsanwendungen sammeln können [10]. Hauptbestandteil solcher geo-referenzierter Datenbasen sind realitätsnahe Straßenabbilder für die Fahrsimulation, die im Laufe der Zeit auch als Basiskarten für Tests in Fahrzeugen Einzug fanden. Die Akquise solcher hochgenauen Daten ist allerdings momentan noch sehr komplex, kostspielig und aufwendig und die Daten sind in der geforderten Qualität und Informationsfülle selten auf kommunaler Ebene oder gar frei verfügbar. Für diesen Zweck hat das DLR den Road2Simulation-Leitfaden veröffentlicht [11], der die Erschließung hochgenauer Straßengeodaten für solche speziellen Anwendungsfälle der Automotive-Domäne einer breiteren Masse von Datenlieferanten ermöglichen soll. Auch im Testfeld Niedersachsen wurde die hochgenaue Straßenkarte nach diesem Leitfaden mit allen dort spezifizierten Straßenraumobjekten durch den Dienstleister atlatec im Mobile-Mapping-Verfahren „eingefahren“ und als XML-basierter OpenDRIVE-Datensatz sowie als vereinfachte Road2Simulation-Datenbasis bereitgestellt [12]. Bild 6 zeigt einen Ausschnitt der HD-Karte.

Beim Mobile-Mapping-Verfahren werden Straßenraumdaten von einer an einem Vermessungsfahrzeug montierten, kalibrierten Erfassungsplattform eingemessen. Üblicherweise arbeiten solche Plattformen mit bildgebender Sensorik, meist mit einer Kombination aus Stereokameras und LiDAR. Im Testfeld wurde ein vom Dienstleister selbstentwickeltes, kompaktes und rein Stereokamera-basiertes Verfahren genutzt, welches ebenfalls die notwendigen Tiefendaten zu den Bildaufnahmen liefert (Bild 5). Durch eine genaue Ortungslösung der Plattform werden solche Bildaufnahmen präzise georeferenziert, was die spätere Ableitung von Orthofotos und dreidimensionalen Objekt- und Oberflächeninformationen entlang der abgefahrenen Strecke ermöglicht. Beim Verfahren von atlatec werden Punktmerkmale der digitalisierten Objekte aus einem stereoskopischen Kamerabildpaar rekonstruiert und „die

den. In der Praxis sind allerdings viele Vermessungsdienstleister spätestens bei der Herleitung semantischer Details und der durchaus komplexen, logischen Objektverknüpfungen einer hochgenauen Straßenkarte auf eine menschgestützte Objektannotation angewiesen. Im OpenDRIVE-Format kann beispielsweise die Gültigkeit eines Straßenschildes explizit für lediglich einen Fahrstreifen festgelegt werden (Bild 8). Für Simulationsanwendungen müssen Lichtsignalanlagen an Kreuzungen zu Signalgruppen zusammengefasst oder eine Haltlinie in Bezug zu einem Stoppschild gesetzt werden. Für eine KI sind solche – oft formatspezifischen – Zuordnungen nicht immer robust herleitbar. Es herrscht großes Forschungsinteresse an diesen Herausforderungen. Eine manuelle Annotation oder Korrektur erfolgt mit speziellen 3-D-Editoren direkt in den georeferenzierten Daten.

„Die Straßendaten wurden mit 5 cm innerer und 20 cm äußerer Genauigkeit erfasst.“

Punktkorrespondenz der relevanten Punkte durch aufwendige Optimierung sehr genau bestimmt“. Im Idealfall folgt darauf eine hochautomatisierte Klassifizierung von relevanten Straßenraumobjekten wie Fahrstreifenmarkierungen, Bordsteinkanten und Straßenschildern mithilfe von KI-Algorithmen (künstliche Intelligenz) auf Basis vorher trainierter Referenzdaten (Bild 7). In diesem automatisierten Prozessierungsschritt können auch die individuellen Objektgeometrien der späteren Straßenkarte generiert wer-

Für Forschungsvorhaben wie das Testfeld Niedersachsen mit seinen unterschiedlichen Anwendungsfällen stellt sich die Frage nach zu erwartenden Koordinatenfehlern einer auf diese Weise erstellten Straßenkarte. Sehr hohe äußere Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich benötigen ein dichtes Passpunktnetz entlang der Strecke, welches bei klassischer terrestrischer Vermessung die Kosten- und Zeitvorgaben schnell explodieren lässt. Revolutionieren könnte dies zukünftig eine hochgenaue, großflächige Passpunkterfassung mit Fernerkundungsmethoden basierend auf Radarsatellitendaten, wie sie am Institut für Methodik der Fernerkundung im Verfahren DriveMark® entwickelt wurde [13]. Diese Passpunkte können zur Orthorektifizierung von Bilddaten und daraus abgeleiteten Straßenraumelementen/Landmarken (landmarks) verwendet werden [14]. Im Testfeld Niedersachsen wurde für die Vermessung der Straßenkarte eine äußere Genauigkeit von 20 cm oder besser gefordert. Laut Dienstleister liegt diese statistisch „in den meisten Fällen“ jedoch sogar unter 10 cm. Aus vermessungstechnischer Sicht mag das ungenau erscheinen, al-

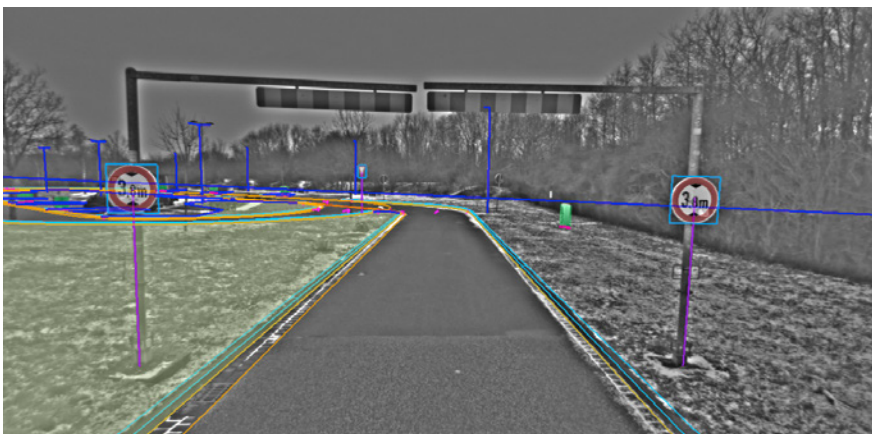


Bild 7: Klassifizierte Straßenraumobjekte der HD-Karte als bunte Überblendung georeferenzierter Kameradaten. (Quelle: atlatec GmbH)



Bild 8: Beispielhafte Querverweise zwischen verschiedenen Elementen eines OpenDRIVE-Datensatzes im XML grün unterstrichen. (Quelle: DLR)

lerdings ist für die skizzierten Anwendungsfälle selten eine höhere äußere Genauigkeit notwendig. Es ist davon auszugehen, dass selbst autonome Forschungsfahrzeuge mit ihren prototypischen Sensorsystemen und Echtzeit-Ortungslösungen selten höhere äußere Genauigkeiten bei einer Objekterkennung auf der Straße erzielen, weswegen Kartendaten für den Objektabgleich zur Eigenlokalisierung nicht unnötig genau sein müssen und dadurch bei solch einem großflächigen Vorhaben Kosten eingespart werden können. Die Erfahrung zeigt: Für viele Erprobungsfahrten ist die äußere Genauigkeit der Karte bisher ausreichend. Die innere Genauigkeit der Daten hängt im Grunde von der Sensorplattform des Mobile-Mapping-Fahrzeugs und der Datenprozessierung des Providers ab und ist somit robuster gegenüber äußeren Einflüssen. Im Testfeld wurde eine innere Genauigkeit von 5 cm oder besser gefordert, die laut Dienstleister innerhalb des Fahrbahnbereichs erfüllt wird. Theoretisch liegt die innere Genauigkeit für Objekte im direkten Umfeld des Vermessungsfahrzeugs im Bereich von einigen Millimetern bis hin zu etwa zwei Zentimetern. Unabhängig von den bisher beschriebenen technischen Rahmenbedingungen entstehen bei der Überführung dieser erfassten Daten in das gewünschte Zielformat Ungenauigkeiten durch beispielsweise mathematische Kurvenanpassungen, die sich aber

in ähnlicher Magnitude bewegen. Selten kommen noch manuelle Annotationsfehler hinzu.

Datenbereitstellung

Für die Verteilung der Straßendaten an Beteiligte im Testfeld Niedersachsen wird auf etablierte Werkzeuge und Schnittstellen der GIS-Domäne zurückgegriffen. Die Datenhaltung erfolgt in einer PostGIS-Datenbank und die eigentliche Datenbereitstellung erfolgt über vom OGC (Open Geospatial Consortium) standardisierte Dienste WMS (Web Map Service) und WFS (Web Feature Service). Hierfür wird GeoServer als quelloffene Softwarekomponente verwendet. GeoServer unterstützt nativ das performante Bereitstellen von PostGIS-Geodaten. Die HD-Straßendaten im Road2Simulation-Datenmodell können auf diese Weise direkt "mit Bordmitteln" veröffentlicht werden, da sie als Datenbank-Dump in PostGIS geladen werden und bereits Tabellen mit Standard-Geometrietypen enthalten.

Für die Anwendungsfälle, die auf komplexe OpenDRIVE-Daten mit ihren parametrisch spezifizierten Geometrien und verschachtelten Objektverweisen angewiesen sind, ist ebenfalls eine Bereitstellung über den GeoServer realisiert worden. Dafür werden die ursprünglichen XML-Daten des OpenDRIVE-Netzes ebenfalls in PostGIS-Tabellen überführt und dabei die parametrischen Geometrien durch Abtastung in diskrete Simple-Feature-Vektorgeometrien

konvertiert. Dies ermöglicht einerseits den performanten Zugriff durch räumliche Indizierung der OpenDRIVE-Daten — die im Testfeldgebiet schnell hundert Megabyte und mehr umfassen — und andererseits deren Bereitstellung ebenfalls über WMS und WFS. Allerdings sind für den WFS lediglich standardmäßig vom GeoServer unterstützte Ausgabeformate wie GML, Shapefile, KML, JSON und CSV verfügbar. Für eine Ausgabe in OpenDRIVE wurde der GeoServer vom DLR entsprechend erweitert [15]. Auf diese Weise können zugreifende Applikationen über den WFS weiterhin standardisiert nach Attributwerten filtern oder die OpenDRIVE-Ausgabe auf eine räumliche Teilmenge per Bounding Box beschränken.

Zusammenfassung und Ausblick

Die skizzierten Anwendungsfälle des Testfelds Niedersachsen zeigen, dass der eingedeutschte Begriff "HD-Karte" (von "HD map" im Englischen) im Sinne von "high definition" eher den hohen Detailreichtum einer zusammenhängenden Straßeninfrastrukturdatenbasis beschreibt als notwendigerweise hohe innere und äußere Genauigkeiten dieser Daten. Es ist zwar wünschenswert, wenn die Geodaten hohe Genauigkeiten aufweisen, allerdings haben sich Genauigkeiten im Zentimeter- bis niedrigen Dezimeterbereich bereits als zufriedenstellend herausgestellt. In diesem Zusammenhang kann im Kontext der Entwicklung automatisierter und vernetzter

Mobilität die für "HD map" im Deutschen geläufige Übersetzung "hochgenaue Straßenkarte" irreführend sein beziehungsweise falsche Versprechungen wecken.

Aufgrund des aktuell noch hohen Aufwands für die Erfassung solcher detaillierter Straßendaten, und vor allem durch die schwerfällige "Instandhaltung", eignen sich HD-Straßenkarten primär für Test- und Entwicklungszwecke auf dem Weg zum vernetzten und (hoch-)automatisierten Fahren. Zukünftige Fahrzeugsysteme werden gänzlich ohne Karte oder nur mit kleinen, leichtgewichtigen Teilmengen der heute verwendeten HD-Karten zuverlässig funktionieren müssen. Solche Kartenextrakte werden wahrscheinlich schwarmbasiert (crowd-sourced) durch sensorisch ausgestattete Serienfahrzeuge erfasst und bedürftigen Verkehrsteilnehmern kontinuierlich über zentrale Systeme „aus der Luft“ bereitgestellt werden. Die Kommunikation dieser Daten wird über standardisierte Schnittstellen der Datenanbieter oder Fahrzeughersteller und/oder per Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation erfolgen. Die Übergangsphase der Kartendatenerfassung können bildbasierte Fernerkundungsverfahren prägen, die in Verbindung mit einem hohen Automatisierungsgrad der Bildprozessierung Teile einer HD-Karte für räumlich ausgedehnte Gebiete in kurzer Zeit liefern könnten [16] [17]. Dabei bleibt die Gewährleistung der Datenaktualität allerdings weiterhin eine Herausforderung, wenn auch solche Verfahren kürzere Update-Zyklen als terrestrische Mobile-Mapping-Befahrungen in Aussicht stellen. Wo in urbanen Räumen oder kleineren Regionen Drohnen infrage kommen, können satellitengestützte Verfahren zukünftig an Bedeutung gewinnen. Dabei kann sogar eine hohe äußere Genauigkeit erzielt werden, wenn Landmarken aus Radarmessungen zur Referenzierung verwendet werden [13]. Luftgestützte Radarmessungen eignen sich ebenfalls zur Erfassung der Fahrbahnbeschaffenheit und können so den autonomen Systemen Meta-Informationen einer zu erwartenden Straßenqualität während des Routings liefern [18].

Literatur

- [1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., „Testfeld Niedersachsen für automatisierte und vernetzte Mobilität“. 2019, Online: <https://testfeld-nds.de>.
- [2] M. Scholz, „Of geodata challenges in OpenDRIVE standardization“. Presentation at 115th

OGC Member Meeting - Smart Roads Summit, Juni 2020, Online: <https://elib.dlr.de/135239>.

- [3] iMOVE Australia, „HD maps for automated driving – literature review“. Jan. 2021, Online: <https://imoveaustralia.com/project/hd-maps-for-automated-driving>.
- [4] DIN, „DIN ISO 5725 Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1:1994)“, Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 1997. doi:10.30607/344872.
- [5] ASAM e. V., „ASAM OpenDRIVE“. Online: <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive>.
- [6] F. Andert und H. H. Mosebach, „LiDAR SLAM positioning quality evaluation in urban road traffic“, in Intelligent transport systems. From research and development to the market uptake. INTSYS 2019. Lecture notes of the institute for computer sciences, social informatics and telecommunications engineering, Bd. 310, A. Martins, J. Ferreira, und A. Kocian, Hrsg. Springer International Publishing, 2020, S. 277–291.
- [7] Open Geospatial Consortium Inc., „OpenGIS implementation standard for geographic information – Simple Feature access – Part 1: Common architecture“, 2011. Online: <https://www.ogc.org/standards/sfa>.
- [8] J. Ludwig, „Elektronischer Horizont für vorausschauende Kartendaten“, ATZechnik, Bd. 9, Nr. 7, S. 24–27, Okt. 2014, doi: 10.1365/s35658-014-0486-5.
- [9] R. Ebendt, „A flexibly linkable meta layer of geographic features supplementary for driving automation and simulation“, in 19th Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition (DSC 2020 europe VR), 2020, S. 19–26, [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/136011>.
- [10] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrssystemtechnik, „Eine virtuelle Welt für ein reales Fahrgefühl“. 2016, [Online]. Available: https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-11264/19778_read-46760.
- [11] A. Richter und M. Scholz, „Road2Simulation-Leitfaden“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Zenodo, 2019. doi: 10.5281/zenodo.3375549.
- [12] atlatec GmbH, „Clients & success stories: German Aerospace Center“. 2021, [Online]. Available: <https://atlatec.de/german-aerospace-center-dlr>.
- [13] H. Runge, U. Balss, S. Suchandt, R. Klarner, und X. Cong, „DriveMark – Generation of high resolution road maps with radar satellites“, 2016, [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/105774>.
- [14] F. Kurz, T. Krauß, H. Runge, D. Rosenbaum, und P. d'Angelo, „Precise aerial image orientation using SAR ground control points for mapping of urban landmarks“, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. XLII-2/W13, S. 61–66, Juni 2019, doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w13-61-2019.
- [15] M. Scholz, „High-performance serving of large-scale OpenDRIVE datasets using standardized GIS technology“. Presentation at 6th Symposium Driving Simulation, Nov. 2020, [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/136079>.
- [16] F. Kurz, S. Azimi, C.-Y. Sheu, und P. d'Angelo, „Deep-Learning segmentation and 3D reconstruction of road markings using multi-view aerial imagery“, ISPRS International Journal of Geo-Information, Bd. 8, Nr. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/ijgi8010047.
- [17] Bayerischer Rundfunk, „Autonomes Fahren mit Hilfe von Satelliten: HD-Straßenkarten aus dem All“. März 2021, [Online]. Available: <https://youtu.be/nLEQMwdsBM>.
- [18] A. Babu, S. Baumgartner, und G. Krieger, „Road surface condition monitoring using fully polarimetric airborne SAR data“, Apr. 2021, [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/133971>.



Dipl.-Geoinf. Michael Scholz
E-Mail: Michael.scholz@dlr.de



Dipl.-Ing. Lennart Asbach
E-Mail: Lennart.Asbach@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, www.dlr.de/ts